

# 최적화기법에 기초한 정적처짐을 이용한 교량의 손상평가기법

## Damage Identification based on optimization technique for bridges using static displacement

최일윤\*, 이준석\*\*, 임명재\*\*\*, 이현석\*\*\*  
Choi, Il-Yoon, Lee, Jun S, Yim, Myoung-Jae Lee, Hyun Suk

### ABSTRACT

A damage identification technique using static displacements was investigated to assess the structural integrity of bridge structures. For this, the optimization technique was utilized. In this study, structural damage was represented by the reduction in the stiffness of an element. Next, a health index of the element was introduced to estimate the stiffness reduction of the bridge under consideration. Comparisons with numerical and experimental tests were performed to investigate the applicability of the proposed method in the practical field. Various damage scenarios were considered by varying damage-width as well as damage-degree. The influence of noise on the damage identification scheme was also investigated numerically. Finally, the applicability and the limitation of the proposed method were discussed.

### 1. 서론

교량구조물이 적절한 기준에 따라 설계·시공된 경우에도, 열화와 손상은 발생할 수 있다. 이러한 손상은 반복하중, 환경적 위해요인, 과하중, 바람, 지진 등 여러 가지 요인에 의하여 발생한다. 사회간접자본인 교량과 같은 토목구조물에서 이러한 열화와 손상은 소중한 인명 피해 및 거대한 사회경제적 충격을 유발할 우려가 있다. 따라서, 교량구조물에 대한 적절하고 정밀한 점검 및 손상규명은 매우 중요하다. 교량의 성능조사 방법에는 육안조사, 비파괴검사법(NDE), 하중재하시험 및 손상추정기법(System Identification, SI) 등이 있으며, 구조물의 진동특성을 이용하여 손상의 위치와 정도를 규명하는 SI기법은 1970년대 말에 토목분야에 도입되었다.

System Identification 기법은 동적 특성의 변화를 주로 이용하고 있으며, 특히 주파수영역에서 모드특성을 이용하여 손상을 추정하는 알고리즘에 대한 개발이 주로 이루어져 왔다.(Doebbling, 1996) Cawley 이후, Hassiotis, Fabrizio와 Lee 등은 고유진동수를 이용한 손상도 추정기법을 개발하였으나, 고유진동수의 변화는 손상에 대해 민감하지 않은 단점이 있다. Stubbs 등은 비교적 손상에 대한 민감도가 높은 것으로 알려진 모드형상을 이용한 손상추정기법을 제시하였다. 또한, Wang과 Choi 등은 시간영역의 손상추정기법에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 교량의 정적처짐을 이용하여 손상을 평가하는 기법을 제안하였으며, 수치해석과 실험결과를 통하여 개발된 기법의 유용성을 검증하였다.

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

## 2. 정식화

정적처짐을 이용하여 구조부재의 손상도를 추정하기 위하여 최적화기법을 도입하였다. 손상추정을 위한 최적화 문제를 풀기 위하여 선형 및 비선형 제약조건을 갖는 최적화문제에 잘 적용되는 것으로 알려진 ADS(Automatic Design Synthesis) 프로그램을 이용하였다. 본 논문에서는 무제약 최적화문제를 풀기 위하여 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)기법과 Golden section 기법이 적용되었다. 손상은 구조 부재의 강성의 감소로 정의되었으며, 최적화 과정에서 부재의 강성이 업데이트 된다.

$$\bar{X} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{nl}) \quad (1)$$

여기서,  $\beta_i$ :  $i$ th 부재의 유효강성비, 또는 Health index.

최적화문제에서 목적함수는 무손상 상태의 유한요소해석과 손상상태의 측정을 통한 처짐값으로부터 다음과 같이 구성되었다.

$$F = \sum_{i=1}^{nm} \left| \frac{D_i^M}{D_i^C} - 1 \right| \quad (2)$$

여기서,  $D_i^M$ 과  $D_i^C$ 는 각각  $i$ th 절점에서의 측정처짐과 계산처짐을 의미하고,  $nm$  은 절점의 수를 의미한다.

이론적으로 강성은 '0' 보다 크고, 최초 건설 당시의 강성보다 클 수 없으나, 초기 강성을 정확히 알기가 현실적으로 어려우므로 초기강성의 20%를 상향조정하여 다음과 같이 경계조건을 조정하였다.

$$0 \leq \beta_i \leq 1.2 \beta_i^{ini} \quad i = 1, 2, \dots, nl \quad (3)$$

여기서,  $\beta_i^{ini}$ 와  $\beta_i$ 는 각각 무손상 상태와 손상후의 유효강성비이며,  $nl$ 은 추정하고자 하는 구조부재의 총 갯수이다.

유한요소 모델 업데이트를 이용한 손상추정과정은 그림 1과 같다.

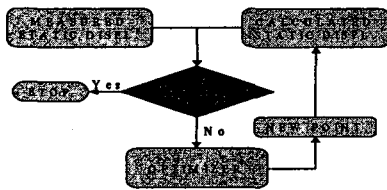


그림 1 손상추정 알고리즘

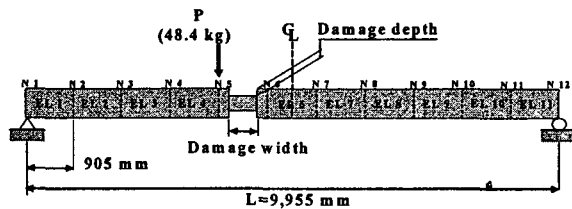


그림 2 보 모델

## 3. 수치예제 및 실험예제 적용결과

### 3.1 수치예제 적용결과

최적화에 기초한 손상평가기법의 적용성을 검토하기 위하여 표 1과 같은 단면제원을 갖는 그림 2와 같은 수치모델을 고려하였다. 손상 부재의 위치와 손상의 정도를 표 2와 같은 손상 도입 시나리오에 따라 손상을 도입하였다. 손상은 강성의 저하로 가정하였고, 손상의 정도 뿐만 아니라 손상 폭의 영향이 손상 추정과정에 미치는 영향을 고려하기 위하여 부재의 중앙부분의 일부분에 손상이 발생한 경우를 표 3과 같이 고려하였다. 표 3에서 Model 1은 부재 전체에 손상이 도입되었음을 의미하며, Model 7은 905mm의 부재내에 3.987mm의 손상폭을 갖는 손상이 해당 부재의 중

양부분에 도입되었음을 의미한다.

표 1 보 모델 제원

Type	H×B (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	Span (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Weight (kg/m)	Moment of Inertia (mm <sup>4</sup> )
H-Beam	100×100	6	8	9,955	2190	17.2	3,830,000

표 2 손상시나리오

Damage Case	Damage Ele. No.	Degree of Damage	Damage Case	Damage Ele. No.	Degree of Damage
DC I	6	20%	DC IV	5	20%
DC II	6	35%	DC V	5	35%
DC III	6	50%	DC VI	5	50%

표 3 손상폭

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Damage Width (mm)	905	452.5	100.56	39.35	12.067	3.987

표 2와 표 3의 손상 정도 및 손상 폭에 따라 그림 2와 같이 정적하중(48.4kgf)을 절점에 재하한 경우에 대한 처짐값을 구조해석을 통하여 구하였다. 그리고, 구조해석을 통하여 얻은 처짐값을 이용하여 제시된 손상평가 알고리즘에 따라 부재의 손상도를 추정하였다.

그림 3 (a), (b), (c)는 그림 2에 나타난 보 모델의 6번 부재에 각각 20%, 35%, 50%의 손상이 발생한 경우에 대한 손상추정결과이고, 그림 3(d), (e), (f)는 5번 부재에 각각 20%, 35%, 50%의 손상이 도입된 경우에 대한 손상 추정결과이다. 손상의 폭이 손상추정결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 도입된 손상의 폭, 즉 Model 별로 손상추정결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 부재 전체에 손상이 발생한 Model 1의 경우, 손상부재에서 Health index의 값이 가장 작게 나타나고 있어서 손상의 위치를 개략적으로 추정이 가능함을 알 수 있다. 다만, 손상 부재 근처의 부재들의 Health index의 값은 다소의 오차를 나타내고 있다. 또한, 손상의 정도도 다소 작게 평가하고 있음을 알 수 있다.

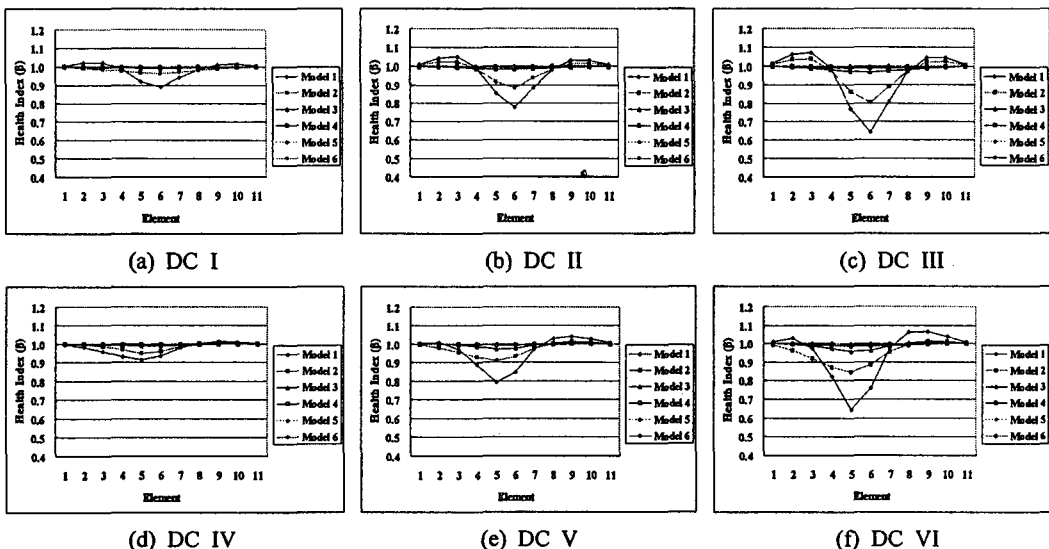
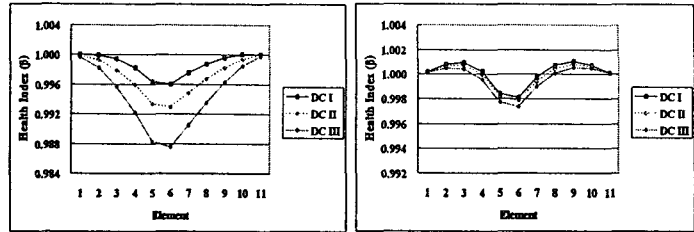


그림 3 손상추정결과 (Noise free)

한편, 손상의 폭이 작은 Model 4와 Model 6에 대한 손상추정결과를 그림 4에 나타내었다. 손상의 정도가 비교적 큰 경우에도 손상의 폭이 작다면, 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 손상의 정도를 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 다만, 손상 부재의 Health index의 값이 무손상 부재의 Health index의 값보다 상대적으로 작게 평가되고 있다는 사실로부터, 손상발생위치를 개략적으로 추정 가능성이 있다고 판단된다.

손상의 폭이 작은 경우에 손상추정결과에 있어서 손상의 정도를 과소평가하는 원인은 다음 두가지의 원인에서 기인하는 것으로 판단된다. 첫째, 손상의 폭이 작은 경우에는 정적처짐의 변화에 미치는 영향이 크지 않다는 사실이다. 둘째, 손상추정과정에서는 계측센서의 수량이 많지 않기 때문에 측정위치의 수가 제한되며, 손상이 부재의 길이 전체에 분포되어 있는 것으로 가정한다. 즉, 부재의 일부분에 손상이 발생한 경우에도 손상추정과정에서는 부재의 등가강성을 추정하기 때문에, 국부적인 손상은 부재의 등가강성의 감소에 큰 영향을 미치지 않는다.



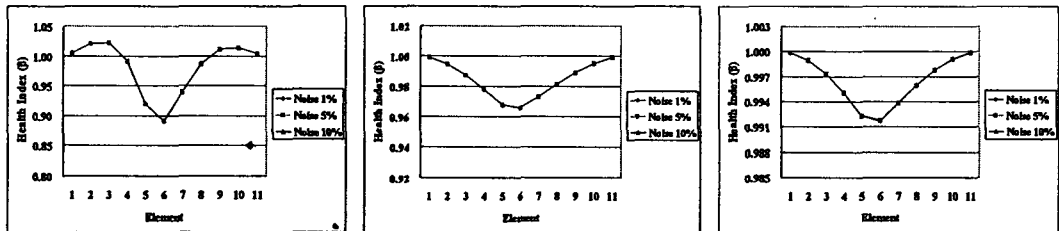
(a) Model 4

(b) Model 6

그림 4 손상추정결과 (Noise free)

### Noise effect

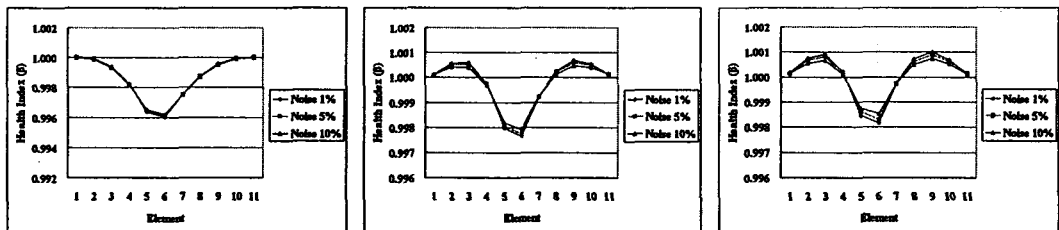
일반적으로 손상추정에 있어서 노이즈의 존재는 손상추정 결과의 정확도를 감소시킨다. 그러나, 현실적으로 계측장비를 이용하여 구조물의 응답을 측정하는 경우에는 계측데이터에 노이즈가 포함되어 있게 된다. 따라서, 손상추정결과에 노이즈에 대한 민감도를 조사하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 수치해석적으로 획득한 구조물의 응답에 일정한 White-noise를 추가하여 노이즈의 영향을 검토하였다. 표준편차가 최대응답의 1%, 5%, 10%를 갖는 White-noise를 생성하여, 구조물 응답에 추가하여 손상추정을 수행하였다. 노이즈의 영향을 고려한 손상추정결과 중 DC I의 경우에 대한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있는바와 같이 제시된 기법은 비교적 노이즈의 영향에 민감하지 않았다. 표준편차가 최대 응답의 1%를 갖는 노이즈가 포함된 경우는 물론 노이즈의 표준편차가 10%로 증가된 경우에도 손상추정결과에 큰 영향을 미치지 않았다.



(a) Model 1

(b) Model 2

(c) Model 3



(d) Model 4

(e) Model 5

(f) Model 6

그림 5 노이즈의 영향(DC I)

### 3.2 모형실험 적용결과

개발된 기법의 현장 적용성을 검토하기 위하여 실내실험을 실시하였으며, 실험데이터를 이용하여 손상도 평가를 수행하였다. 실내실험에 사용된 시험편의 제원은 표 1에 나타난 수치해석의 경우와 같고, 손상도입 시나리오는 그림 6과 같다. 그림 6과 같은 손상시나리오에 따라 손상을 도입하고, 각각의 경우에 대하여 48.4kgf의 정적하중을 표 4와 같이 재하하여 각 절점에서의 처짐값을 측정하였다. 각 절점의 처짐값을 사용하여 개발된 손상평가기법을 사용하여 손상평가를 수행하였다.

손상추정결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 바와 같이 손상폭이 작은 손상에 대한 추정결과는 만족스럽지 못하였다. 그러나, 손상 폭이 증가함에 따라 손상위치를 비교적 정확하게 규명하였다. 그림 7(e)의

DC VI 경우, 손상이 522mm에 걸쳐 50%의 손상이 도입되었는데, 추정된 Health index의 값이 약 0.65로써 실제값 0.5보다 다소 크게 추정되었다. 즉, 손상의 정도를 다소 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 7(f)의 DC VII의 경우, 부재 길이(905mm)와 도입된 손상 폭(880mm)이 거의 일치하는 손상이 도입된 경우에 해당한다. 부재 길이 전체에 걸쳐 손상이 도입된 경우의 손상추정 결과는 손상위치 뿐만 아니라 손상정도도 실제값과 거의 동일하게 추정하고 있음을 알 수 있다.

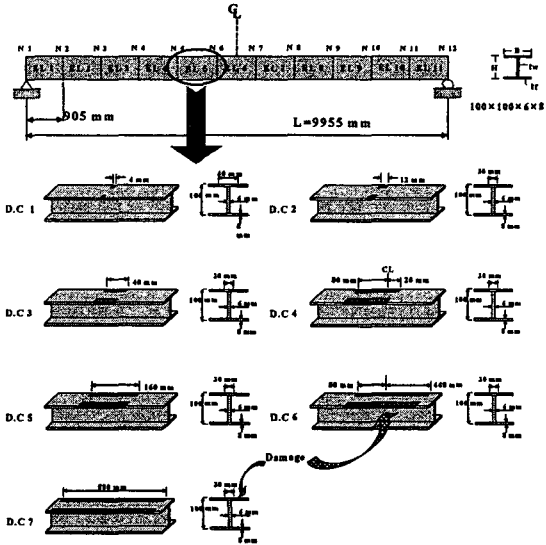


그림 6 손상도입시나리오

표 4 하중재하조건(48.4kgf)

Load Case	LC_1	LC_2	LC_3	LC_4	LC_5	LC_6	LC_7	LC_8	LC_9	LC_10
Location of Loading	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7	Node 8	Node 9	Node 10	Node 11

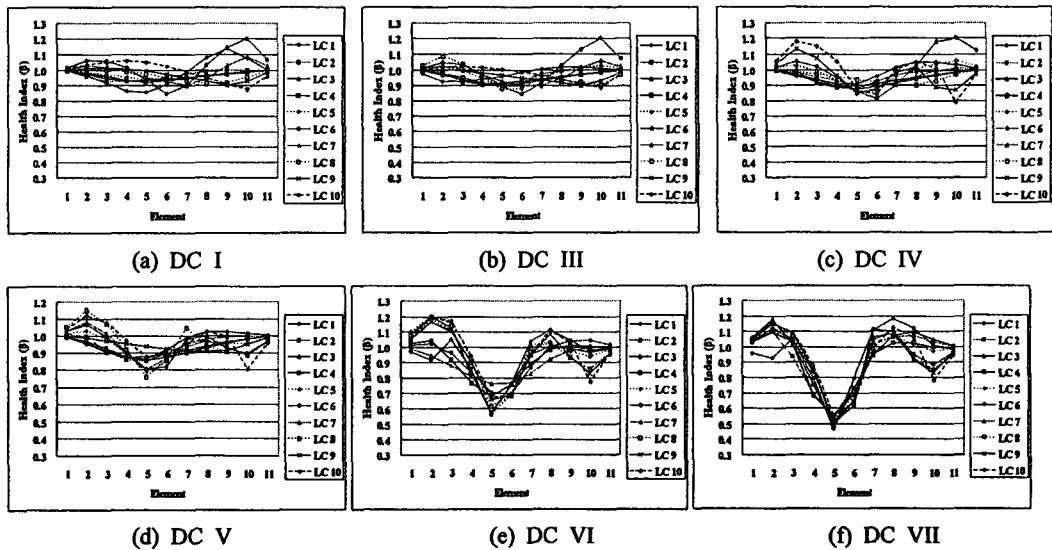


그림 7 모형실험 데이터를 이용한 손상추정결과

이러한 현상은 손상추정과정에서 추정하고자 분할한 요소의 길이에 대한 요소내에 도입된 손상 폭의 비가 손상 정도의 추정에 영향을 미치고 있음을 의미한다. 즉, 부재 전체의 대표 강성으로 손상을 추정하는 경우에는 부재의 일부분에 발생한 손상이 부재길이 전체로 손상을 분포시키게 된다. 따라서, 부재내의 일부분에만 손상이 발생한 경우에 대한 손상 추정결과는 손상의 정도를 과소평가하게 되며, 균열과 같이 손상폭이 아주 미소한 경우에는 손상규명에 한계를 갖게 됨을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 정적처짐 데이터를 이용하여 최적화기법을 도입한 손상평가기법을 제시하였다. 제시된 기법의 적용성과 한계를 조사하기 위하여 수치예제와 실내실험을 실시하고 그 적용결과를 고찰하였다. 특히, 개발된 기법이 규명할 수 있는 손상 폭의 한계를 보이기 위하여 다양한 손상 폭을 갖는 손상을 고려하였다. 수치예제와 실내실험결과를 바탕으로 제시된 기법의 적용성과 한계를 기술하면 다음과 같다.

비교적 손상 폭이 큰 경우에는 제시된 기법을 이용하여 손상의 위치를 비교적 정확하게 규명할 수 있었으나, 손상의 정도는 손상의 폭에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 또한, 부재를 보다 세분화할수록 손상추정결과는 다소 개선됨을 알 수 있었다.

그러나, 도입된 손상 폭이 아주 작은 경우에는 추정된 손상의 정도 뿐만 아니라, 손상위치추정 결과는 만족스럽지 못하였다. 즉, 균열과 같은 미소한 손상 폭을 갖는 손상을 제시된 기법을 이용하여 규명하는 것은 한계가 있음을 알 수 있다.

따라서, 제시된 기법은 부식에 의한 강성저하 등 손상 폭이 비교적 크게 분포되어 있는 손상을 규명하거나 처짐데이터를 이용하여 부재의 등가 강성을 개략적으로 평가하는 목적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, SI기법 연구에 있어서 균열 등 미소한 손상 폭을 갖는 손상을 규명하고자 하는 경우에는 손상 폭의 영향에 대한 검토와 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W. Damage Identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, *Los Alamos National Laboratory*, 1996.
2. Cawley P. and Adams R.D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies, *J. of Strain Analysis* 1979; Vol 14, No 2, 49-57
3. Hassiotis, S. (2000), *Identification of damage using natural frequencies and Markov parameters*, *Computers and Structures*, 74, 365-373
4. Fabrizio V. and Danilo C. Damage detection in beam structures based on frequency measurements, *J. of Engineering Mechanics* 2000; Vol 126, 7, 761-768
5. Lee, J.S., Choi, I.Y., Moon, D.Y. and Lee, H.H.(2002a) *A study on the damage detection of the structures using optimization technique in frequency domain (I) - Modeling of damages*, *J. of KSCE in korean*, Vol 22, 1-A
6. Stubbs and Kim (1996) *Damage localization in structures without baseline modal parameters*, *AIAA J.*,34(8), 1644-1649
7. Wang, D. Element level time domain system identification technique with unknown input information, *Ph.D. Dissertation*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics 1995, Univ. of Arizona
8. Choi, I.Y., Lee, J.S., Moon, D.Y, Cho, H.N. A Study on the Estimation of Global Stiffness and Damping Matrices in the Time Domain, *J. of KSCE* 2001, in korean, Vol. 21, No. 5-A